

RECONSTRUCCIÓN MULTI-PROXY DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA ACONTECIDA EN SIERRA NEVADA DURANTE LOS TRES ÚLTIMOS MILENIOS INFERIDA A PARTIR DE SEDIMENTOS LACUSTRES Y DOCUMENTOS HISTÓRICOS

Marc OLIVA FRANGANILLO¹, Antonio GÓMEZ ORTIZ¹

¹*Centro de Estudos Geográficos. Universidade de Lisboa, Portugal*

²*Depto. de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional. Universidad de Barcelona*

oliva_marc@yahoo.com, gomez@ub.edu

RESUMEN

La necesidad de alargar las series instrumentales obliga a recurrir a datos *proxy* para enmarcar las tendencias climáticas recientes en la variabilidad natural del clima. Desde una perspectiva paleoclimática, este trabajo presenta evidencias interpretadas de fuentes documentales históricas referidas al paisaje de cumbres de Sierra Nevada y datos inferidos de sedimentos de la Laguna de la Mosca, cuerpo lacustre localizado al pie del pico del Mulhacén. Los sedimentos lacustres sugieren periodos significativamente más fríos y húmedos que el actual durante el Holoceno superior, en especial durante la Pequeña Edad de Hielo (PEH), con aparición secular de un glaciar en el circo del Mulhacén y abundancia de neveros en el macizo. Condiciones más cálidas predominaron durante el Óptimo Climático Romano y Medieval y en la actualidad. A su vez, se han consultado hasta 18 relatos históricos que cubren los últimos 870 años. Estos documentos han permitido cuantificar en 0,93°C el aumento térmico experimentado desde mediados del siglo XIX hasta la actualidad y atestiguan la progresiva fusión de los abundantes neveros y enclaves glaciados repartidos en las cumbres de la Sierra durante la PEH.

Palabras clave: Sierra Nevada, Holoceno superior, variabilidad climática, sedimentos lacustres, documentos históricos.

ABSTRACT

The need to extend the instrumental series requires the use of proxy data to frame the recent climate trends within the natural climate variability. From a paleoclimate perspective, this paper provides evidences from historical documentary sources referring to the landscape of the high lands in Sierra Nevada and data derived from lake sediments of Laguna de la Mosca, a lake located below the Mulhacén peak. Lake sediments suggest the occurrence of significantly colder and wetter periods than today during the Late Holocene, especially during the Little Ice Age (LIA), with brief appearances of a glacier in the Mulhacén cirque and abundant snow patches widespread in the massif. Warmer conditions prevailed during the Roman and Medieval Warm Periods and nowadays. In turn, 18 historical relates covering the last 870 years have been consulted. A temperature increase of ~0.93°C since the mid 19th century has been inferred from these documents, providing written evidences of the gradual melting of the abundant snow fields and small glaciers existing in the high lands of Sierra Nevada during the LIA.

Key words: Sierra Nevada, Late Holocene, climate variability, lake sediments, historical sources.

1. INTRODUCCIÓN

Las áreas de alta montaña se han definido como ámbitos muy apropiados para el estudio de la variabilidad del clima, sobre todo aquéllas de latitudes medias, debido a la rápida respuesta que muestran los parámetros climáticos por imperativo de la altura, que refuerza el gradiente vertical (Wanner et al., 2000). Los ambientes periglaciares y paraglaciares ubicados en ámbitos de alta montaña localizados fuera de los grandes *inlandsis* de altas latitudes, como sucede con Sierra Nevada, son áreas clave para identificar los efectos del calentamiento experimentado durante las últimas décadas, con repercusiones en la dinámica de los sistemas naturales (Warburton, 2007). En la Península Ibérica son escasas las tentativas dirigidas a reconstruir la actividad de los procesos fríos durante el Holoceno debido a la marginalidad espacial de las áreas afectadas por estos procesos. En este artículo, se pretende reconstruir la dinámica ambiental y climática en el macizo de Sierra Nevada a partir de las fuentes documentales y registros sedimentarios de tipo lacustre para los últimos tres milenios.

El uso de documentos históricos para inferir la dinámica pasada de los procesos fríos y de las oscilaciones climáticas ha tenido su máximo auge en Alpes y Escandinavia, donde los estudios se han centrado, particularmente, en las fluctuaciones históricas de los glaciares alpinos (Zumbühl et al., 2008; Nussbaumer et al., 2011). Hasta la fecha, que sepamos, no existen estudios referidos a las montañas ibéricas que hayan pretendido reconstruir el funcionamiento de los procesos geomorfológicos fríos en el pasado - y la variabilidad climática asociada a ellos- mediante la complementariedad de datos procedentes de fuentes documentales y de registros naturales. Para estudiar la variabilidad climática pasada en Sierra Nevada se focalizará la atención en sus tramos de cumbres, en el cinturón periglaciario, donde estudios anteriores han demostrado la existencia de alta sensibilidad a las variaciones climáticas (Oliva et al., 2011). Sierra Nevada se encuadra en el cuadrante suroccidental de la Península, una de las áreas que los modelos climáticos indican que sufrirá de manera más acusada la reducción de precipitación e incremento térmico proyectado para las próximas décadas (IPCC, 2007).

2. ÁREA DE ESTUDIO

En el extremo suroccidental de Europa se alza Sierra Nevada, el macizo ibérico de mayor altura. En el tramo occidental sus alturas sobrepasan holgadamente los 3.000 m (Mulhacén 3.478 m, Veleta 3.398 m), mientras que en el margen oriental su cordal cimero disminuye gradualmente de 2.500-2.000 m hasta las planicies litorales del sureste peninsular. Sierra Nevada se prolonga 80 km de oeste a este, conforme al paralelo 37°, y 30 km de norte a sur en dirección al mar Mediterráneo. Esta disposición geográfica le otorga unas condiciones climáticas de montaña mediterránea semiárida. La compartimentación del relieve comporta una atomización climática tanto en el macizo como en sus áreas circundantes (Oliva, 2009). La oscilación estacional de la Circulación General Atmosférica determina un marcado control de la precipitación durante el semestre frío del año por parte de la *North Atlantic Oscillation* (NAO) en el sector occidental y de la *Western Mediterranean Oscillation* (WeMO) en el oriental (Oliva & Moreno, 2008). La única estación de altura que ofrece una serie relativamente continua es la emplazada en el Albergue Universitario (2.507 m), que funcionó entre 1965 y 1992. Para este periodo, la serie muestra una temperatura media anual de 4,4°C y una precipitación de 710 mm (Oliva, 2009). En las culminaciones del macizo el control térmico de la temperatura del aire ha reflejado valores medios ligeramente negativos durante el periodo 2006-2009 (Salvador et al., 2011).

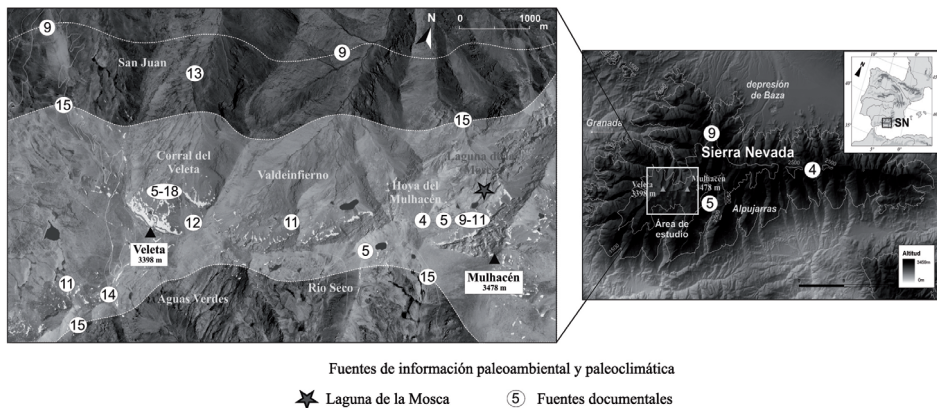


FIG. 1: Zona de estudio y áreas específicas referidas en el texto.

Este artículo centra su interés en el área de cumbres, donde las condiciones climáticas supeditan la dominancia de procesos periglaciares controlados actualmente por la acción combinada del hielo-deshielo en el suelo, viento, nieve y aguas de fusión. De éstas cumbres se analiza la evolución ambiental durante el Holoceno superior y los procesos geomórficos dominantes, como base para la interpretación paleoclimática. Para ello, y desde una perspectiva climática, se tienen en consideración los datos obtenidos a partir del análisis e interpretación de los sedimentos lacustres obtenidos en la Laguna de la Mosca (instalada a 2915 m, al pie del picacho del Mulhacén). Y también, aquellos otros datos procedentes de las descripciones y relatos del paisaje atribuidos a naturalistas y viajeros que durante los últimos siglos recorrieron Sierra Nevada (Figura 1).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Las dos fuentes de información analizadas ofrecen información que permite inferir las condiciones ambientales imperantes en el pasado en las áreas cimaras de la Sierra, a diferentes escalas temporales. El testigo sedimentario LM-1 de 90 cm de longitud extraído de la parte más profunda de la Laguna de la Mosca (3,2 m) ha sido analizado a resolución centimétrica. La susceptibilidad magnética (SM) fue medida con un Bartington MS2E High Resolution Surface scanning system en el Geographisches Institut de la Universidad de Berna (Suiza), donde también se cuantificó el contenido de carbono orgánico (CO) y la relación C/N con un Elemental Analyzer Macro. La textura fue determinada por difracción de rayos X en el Limnogeology Laboratory de la ETH de Zürich (Suiza) con un analizador Malvern laser grain size. El marco cronológico inferido de estos datos proxy se ha establecido con 3 dataciones de C^{14} procesadas por espectrometría de masas (AMS) en el Angstrom Laboratory de Uppsala (Suecia). Las dataciones han sido calibradas con el programa CALIB 6.0 (Reimer et al., 2009). Por lo que a las fuentes documentales históricas se refiere, se han consultado hasta 18 textos escritos entre 1137 y 1947, que describen el paisaje de Sierra Nevada o algún/os de los elementos biofísicos constitutivos. La procedencia de toda esta información documental es de obras originales, facsímil de ellas o traducciones, depositadas en fondos bibliográficos diversos de centros institucionales y privados. Analizada la información de interés particular de cada obra seleccionada, su contenido fue interpretado desde la perspectiva geomorfológica y climática. Asimismo, aquellos relatos o descripciones de mayor relevancia geográfica referidos a sectores o parajes de la Sierra, fueron, también, analizados y contrastados en el campo.

4. RESULTADOS

Se presentan separadamente los resultados correspondientes a:

4.1. Evidencias sedimentológicas inferidas del *core* LM-1 de la Laguna de la Mosca

El *core* LM-1 muestra una significativa alternancia de unidades litoestratigráficas con numerosas variaciones de color y textura (Figura 2). A partir de las variaciones en el contenido de arenas se constatan hasta siete unidades diferentes. Algunas de ellas se caracterizan por un contenido de arenas muy elevado (60-90%), otras tienen una proporción moderada (40-50%) y el resto presentan porcentajes menores (<30%). Los aumentos en el contenido de arenas se correlacionan con picos de SM, ligeras disminuciones del porcentaje de CO e incrementos de la relación C/N (unidades G, D y B). Otras unidades presentan una estabilidad relativa del contenido de sedimentos de tamaño fino con pequeños aumentos de CO (unidades F, E, C y A), si bien en ellas también se detectan pulsaciones con sedimentos más groseros.

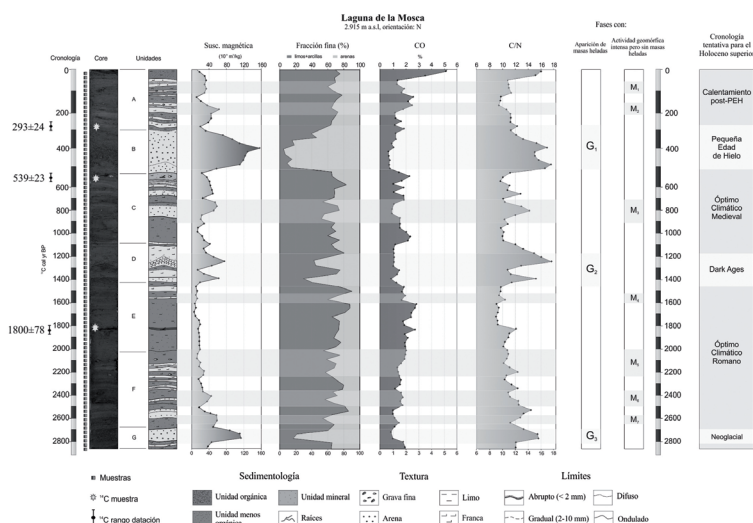


FIG. 2: Marco cronológico y propiedades analizadas de los sedimentos de la Laguna de la Mosca, con las fases climáticas inferidas de ellas para los últimos tres milenios.

4.2. Documentación histórica

Los textos y descripciones de la documentación de época analizada relativa al paisaje histórico nevadense alcanzan los últimos 870 años, cubriendo la ocupación musulmana del sur peninsular y la posterior Reconquista. Son especialmente numerosas a partir del siglo XVIII (Tabla 1). Su naturaleza y contenido particular varía sustancialmente en el tiempo. Primero, informan de aspectos puntuales de la montaña, para después, ya en el siglo XVII, describir aspectos generales de su fisiografía (ríos, topografía, alturas y condiciones climáticas). Instalados en el siglo XVIII y por lo que se refiere al área de cumbres, se centra la atención en el paisaje natural, interesando las aguas y nieves, vegetación y tipo de roquedo, etc. Desde mediados del siglo XIX la descripción incluye la explicación del paisaje, observándose el avance de las ciencias naturales y, en particular, el abandono del relato bíblico por las teorías del actualismo, como respuesta a la nueva noción de interpretar la formación de la Tierra (Gómez Ortiz et al., 2009).

ID	Autor	Descripción literaria	Interpretación ambiental / climática
1	Abi Baku al-Zuhri (1137)	<i>"Y esta montaña es una de las maravillas del mundo porque no se ve limpia de nieve en invierno ni en verano. Allí hay nieve de muchos años que, ennegrecida y solidificada, parece piedra negra, pero cuando se rompe se halla en su interior nieve blanca. En las cumbres las plantas no crecen ni los animales pueden vivir"</i>	Presencia de focos glaciares y neveros en verano. Condiciones frías y húmedas
2	Al-Idrisi (1154)	<i>"Esta cadena se extiende en el espacio de dos jornadas; su altura es muy considerable y las nieves la cubren perpetuamente"</i>	Presencia de focos glaciares (?) y neveros en verano. Condiciones frías y húmedas
3	Mahmud al-Qazwini (1263)	<i>"Monte Sulayr de al-Andalus, del cual no desaparece la nieve en invierno ni en verano y puede verse desde la mayor parte del territorio de al-Andalus por su elevación. Y allí el frío es intenso y continuo"</i>	Presencia de focos glaciares (?) y neveros en verano. Condiciones frías y húmedas
4	Bermúdez de Pedraza (1638)	<i>"Tanta su altura y lo nevado se extiende ocho leguas, desde el puerto de la Ragua, en el marquesado del Zenete hasta Órgiva. Y no podía faltarle el agua, ha conservado la nieve que le envió el cielo después del Diluvio"</i>	Presencia de focos glaciares y neveros en verano. Condiciones frías y húmedas
5	Fernández Navarrete (1732)	<i>"Los parajes de perpetua nieve. El principal es Veleta. Ya se ha dicho su sitio y el de su Corral. En la parte de la umbría del tramo Mulhacén-Veleta se mantiene perpetuamente la nieve y los años muy calurosos hacen veredas por la izquierda y la llevan a costilla más de un cuarto de legua... Hay también nieve todo el año dos leguas sobre Güejar en la Haza de Mesa, y media legua más allá, en la que llaman de la Escaramuza y en la laguna de la Caldera"</i>	Glaciares en los circos septentrionales y neveros en ambas vertientes. Condiciones muy frías y húmedas
6	Murillo Velarde (1752)	<i>"La Sierra está entre Granada y el Mediterráneo: llámase así, porque nunca le falta nieve en lo que llaman el Picacho del Veleta. Hay tanta abundancia en lo más riguroso del Estío como en lo más helado del Invierno"</i>	Presencia de un glaciar en el Corral del Veleta. Condiciones frías y húmedas
7	Pontz (1754)	<i>"Cajón ambicioso de nieve (el Corral del Veleta), que se cree guarda la primera que cayó después del Diluvio, reducida a piedra, pues estando descubierto hacia el norte aquí es hielo lo que es nieve en otros lugares"</i>	Presencia de un glaciar en el Corral del Veleta y neveros en verano. Condiciones frías y húmedas
8	López de Vargas Machuca (1795)	<i>"El Guarnón es un corral de grande profundidad con un depósito de nieve que se puede regular desde qué años, ni para cuantos hay allí, porque la expresada nieve está ya petrificada o cristalizada la más, dividiéndose los nevados de todos los años por las piedras y brocín que meten los aires del verano"</i>	Presencia de un glaciar en el Corral del Veleta. Condiciones frías y húmedas
9	Rojas Clemente (1809)	<i>"Nota de paso que todas las altas cumbres de Sierra Nevada están peladas no porque deje de caer en ellas la nieve, sino porque la arrojan de ellas los vientos fuertes a que están expuestas, así muy cerca de ellas, como 100 varas o menos más abajo (así se observa en el Mulhacén y Veleta), ya se hallan grandísimas ventisqueros perpetuos. El verdadero límite de las nieves perpetuas o permanentes en el norte de Sierra Nevada será aproximadamente a 2800 varas sobre el nivel del mar"</i>	Presencia de un glaciar en el Corral del Veleta y Hoya del Mulhacén y abundantes neveros en verano. Límite de los procesos crionivales en 2436 m

ID	Autor	Descripción literaria	Interpretación ambiental / climática
10	Boissier (1845)	<i>“Es el único en toda la Sierra y el más meridional de Europa: debe su formación a su posición, en el fondo de un circo abrigado y dominado por altas cumbres donde las tormentas barren la nieve en invierno... Esta región (se refiere a la región nevosa) comprende todas las partes superiores de Sierra Nevada, a partir de 8000 pies. En los Alpes a esta altitud ya se hayan las nieves perpetuas, aquí nada parecido: sin embargo, la nieve caracteriza nuestra región, aunque solamente bajo la forma de manchas o montones acumulados en los bajos fondos y pliegues del terreno. Desde final de septiembre, toda la región se cubre de una nieve nueva, que sólo desaparecerá parcialmente a partir de junio, y la cubre pues completamente durante ocho meses”</i>	Presencia de un glaciar en el Corral del Veleta, desaparición del glaciar del Mulhacén? Evolución hacia condiciones menos favorables para el desarrollo glaciar, probablemente vinculado a temperaturas más cálidas
11	Madoz (1849)	<i>“Los parajes que en estas dos elevadas montañas, Mulhacén y Veleta, y en sus inmediaciones, se hallan cubiertos de perpetuas y endurecidas nieves, cuyas capas o estratificaciones se pueden contar fácilmente en muchas de sus quebradas, se llaman en el país corrales: el más considerable de todos ellos es el nombrado Veleta, el cual por su situación entre el pico de su nombre y el de Mulhacén presenta la figura de un gran circo, en cuyo centro brotan las primeras aguas del Genil. La nieve, acopiada por los vientos, que encierra el grandísimo depósito de este corral, está tan petrificada, que tiene la consistencia del mármol más duro”</i>	Presencia de focos glaciares en el área Mulhacén-Veleta. Última referencia escrita a la existencia de un glaciar en la Hoya del Mulhacén. Condiciones frías y húmedas
12	Wilkomm (1882)	<i>“Muy pegado al borde del vertiginoso abismo podía estudiar el colosal valle de circo prolongado al sur, en cuyo ángulo más al fondo, justo debajo de los despeñaderos gigantescos del Picacho, se veía la nitida silueta del helero del Veleta. Por encima del glaciar del Veleta se veía un enorme ventisquero aún más inclinado, que llega a una pared muy escabrosa, de una altura de casi 500 metros”</i>	Presencia de un glaciar en el Corral del Veleta y neveros en verano. Condiciones tendientes a más desfavorables a la permanencia de focos glaciares en la Sierra
13	Rute (1889)	<i>“Desde allí se veían los ventisqueros anunciados que dan afluentes al Poqueira. Llegamos al río Veleta y a Prados del Veleta (2600 m) a las 2 horas de la tarde. Nos decidimos a pasar el primer ventisquero, que tenía abrupta pendiente, que bautizamos con el nombre del Repecho del Mulo”</i>	Presencia de grandes ventisqueros en Basares del Veleta
14	Bide (1893)	<i>“Sobre los gradieros gigantescos de este circo (alude a los Basares del Veleta) reposan grandes nevés que persisten durante los veranos más cálidos. Nosotros atravesamos este campo de nieve muy dura y alcanzamos el collado del Veleta (3195 m)”</i>	Presencia de paquetes de hielos en Basares del Veleta. Condiciones más desfavorables a la permanencia del glaciares en la Sierra
15	Quelle (1908)	<i>“El glaciar del Veleta debe su existencia única y exclusivamente al hecho de que está orientado hacia el norte, al abrigo de altas paredes. El borde inferior del glaciar está a una altitud de 2850 m; según Hellmann, a 2845 m; según Boissier, a 2850 m; y yo mismo lo establecí en 2835 m. Está claro que no podemos utilizar el glaciar del Veleta para determinar el límite climático de las nieves perpetuas, ya que debe su existencia únicamente a su situación extremadamente favorable. Sólo los heleros nos pueden proporcionar un punto de partida. En la cara sur de la Sierra la altitud media del extremo inferior de estos heleros está aproximadamente a 3000 m, en la cara norte a 2850 m”</i>	Presencia de un glaciar en el Corral del Veleta, neveros localizados a 2850 en cara norte y 3000 m en cara sur

ID	Autor	Descripción literaria	Interpretación ambiental / climática
16	Encic.Universal 1912-1919	<i>“Tiene este helero unos 580 m de largo por 250 m de ancho y en él se encuentra el hielo azul, las grietas, las morrenas propias de los demás heleros”</i>	Descripción del glaciar del Veleta
17	Obermaier (1916)	<i>“El ventisquero del Veleta es una masa de hielo muerto, sin movimiento ni fluctuaciones”</i>	Degradación del glaciar del Veleta. Condiciones no suficientemente frías y húmedas para el mantenimiento del glaciar
18	García Sainz (1947)	<i>“El pequeño glaciar del Veleta está formado por capas de hielo y neviza, como los actuales neveros del Prineo”</i>	Última referencia al glaciar del Veleta. Condiciones más cálidas y/o secas

TABLA 1: Fuentes documentales y descripciones usadas en el presente artículo con la interpretación Geomorfológica y climática asociada (Oliva y Gómez Ortiz, 2012). las tres primeras referencias están citadas en Torres Palomo (1968).

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los registros sedimentarios lacustres y las fuentes de información documental permiten obtener evidencias sobre la evolución climática en las cumbres nevadenses durante los últimos milenios, si bien a distinta resolución temporal.

5.1. Régimen climático inferido del archivo sedimentario lacustre

Según las tres dataciones existentes para el *core* LM-1, esta secuencia sedimentaria de la Laguna de la Mosca abarca aproximadamente los últimos tres milenios. Este *core* sugiere una evolución ambiental compleja, con una mayor actividad de los procesos geomórficos en esta cuenca durante el Holoceno superior que en los altos barrancos de la ladera sur de Sierra Nevada (Oliva et al., 2010). Los tres episodios con mayor deposición de partículas minerales gruesas (arenas) se interpretan como respuesta a períodos climáticos fríos y húmedos con una escorrentía superficial importante (G_3 - G_1). La disminución de CO y aumentos de C/N son también indicativos de un régimen climático más frío y húmedo, con disminución de cubierta vegetal en la cuenca y una menor productividad interna del lago. Sólo la existencia de un pequeño foco glaciar en el circo de Mulhacén podría explicar una mayor disponibilidad líquida que supondría mayor capacidad de movilización y transporte de partículas arenosas hacia el fondo del lago. La combinación de niveles de humedad elevados y condiciones térmicas sensiblemente más frías que en la actualidad favorecería la presencia de un foco glaciar aproximadamente en 2800-2700 (G_3), 1400-1200 (G_2) y 510-240 años BP (G_3). En base a la magnitud de las variaciones de los datos aquí presentados, la Pequeña Edad de Hielo debe haber sido la fase más fría y húmeda de los últimos tres milenios en Sierra Nevada.

Condiciones de frío y humedad menos acentuadas debieron de promover una actividad más modesta de los procesos geomórficos en este circo. Así, las unidades M_7 - M_1 contienen sedimentos con una abundancia moderada de arenas y disminuciones relativas de CO. Son también periodos propensos a una erosión intensa, con movilización de partículas minerales (arenas y limos) gracias a una escorrentía superficial elevada, probablemente debido a la existencia de abundantes neveros de fusión tardía en este circo, aunque sin presencia de masa glaciar. Por el contrario, las fases en que la sedimentación era mayoritariamente compuesta por partículas finas (limos y arcillas) con aumentos de CO deberían corresponder a periodos de menor actividad geomórfica. Probablemente estas condiciones vendrían favorecidas por unas temperaturas más cálidas, que comportarían una rápida fusión de la cobertura nival, impidiendo así el desarrollo de extensos neveros o focos glaciares. Esto aconteció durante el Óptimo Climático Romano (OCR), Óptimo Climático Medieval (OCM) y parece detectarse también en la actualidad, aunque la actividad antrópica – básicamente trashumancia y turismo – puede haber afectado la sedimentación natural del lago durante las últimas décadas.

5.2. Información paleoambiental derivada de los archivos de época

En el caso de las fuentes documentales, las evidencias escritas constatan ya durante los siglos XII y XIII la singularidad de Sierra Nevada, donde la profusión y abundancia de la nieve, la distinguía en el contexto regional. A tenor de los escritos, incluso se insinúa la probable existencia de focos glaciares durante este periodo y neveros permanentes. Después de un vacío temporal en los escritos encontrados relativos al paisaje de cumbres de Sierra Nevada – que se alarga entre finales del siglo XIII y mediados del XVII –, las referencias vuelven a ser abundantes. La mayoría de ellas enfatizan dos elementos: la abundancia de neveros que permanecían a lo largo de la estación cálida en los sectores cimeros y la existencia de focos glaciares en los circos septentrionales, además de referencias

repetitivas al comportamiento extremo del frío y los vientos. La última cita específica a la existencia de un foco glaciar en la Hoya del Mulhacén se remonta a 1849, mientras los documentos escritos atestiguan que el glaciar del Corral del Veleta permaneció hasta mediados de siglo XX, un siglo más tarde. La causa de esta pauta divergente radica en las diferentes condiciones morfotopográficas, altimétricas y de orientación entre ambos enclaves, más favorables la continuidad de hielos en el Corral del Veleta que en la Hoya del Mulhacén, hecho que en la actualidad aún persiste, aunque ahora reflejado en el mantenimiento de la nieve.

5.3. Síntesis de ambas fuentes de información

A pesar de su distinta resolución temporal, los datos sugieren una evolución sincrónica durante el periodo de solapamiento entre ambos registros, que alcanza los últimos 870 años (Figura 3). Las primeras referencias escritas durante la ocupación musulmana del sur ibérico revelan la presencia de nieve (y, probablemente, de hielo) en la Sierra y se correlacionan con un período de actividad geomorfológica significativa según se infiere de los sedimentos de La Mosca (M_2). Otros registros sedimentarios de cumbres, como sucede con los lóbulos de solifluxión en turberas, también apuntan a un aumento de la actividad geomórfica durante este período (Oliva et al., 2009) (Figura 3). Por tanto, entre los siglos XII y XIII se deduce un régimen climático más frío y húmedo que el actual.

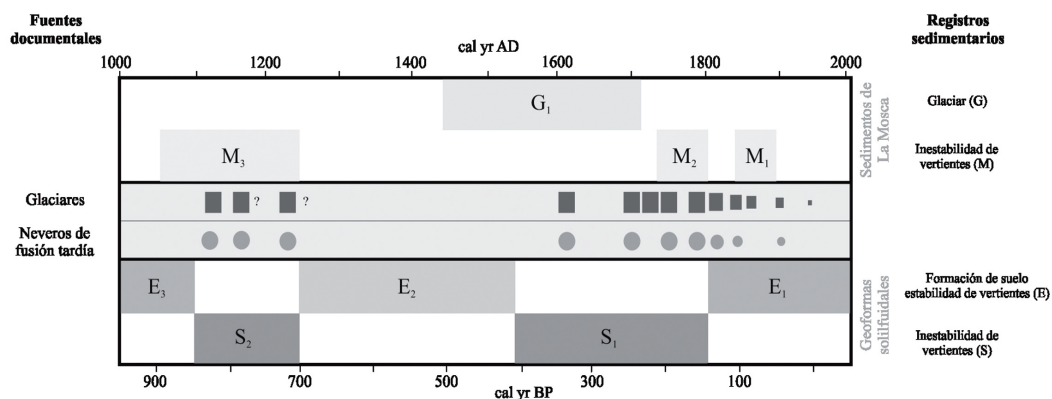


Fig. 3: Síntesis de la información ambiental inferida de ambas fuentes de información.

Para la última fase de desarrollo glaciar en la Hoya del Mulhacén (G_1), las fuentes documentales describen la existencia de focos de hielos glaciares en los circos del Mulhacén y Veleta. Condiciones más frías y húmedas también se han concretado para este período a partir de los registros solifluídales (Oliva et al., 2009). El *core* LM-1 sugiere la existencia de un foco glaciar en el Mulhacén entre 1440 y 1710 AD y la probable presencia de grandes neveros durante el siglo XIX. La tendencia hacia el aumento térmico iniciada en las últimas décadas del siglo XIX ha condicionado la fusión de los últimos glaciares en la Sierra (Gómez Ortiz et al., 2009), una menor profusión de neveros y una mayor estabilidad geomórfica con desarrollo e intensificación de los procesos edáficos en las cabeceras de los barrancos de Sierra Nevada. El último relato que afirma la presencia glaciar en el circo del Mulhacén es de fecha de 1849, si bien los estudios geocronológicos de la Laguna de la

Mosca sugieren que fue a inicios de siglo XVII. Este desajuste temporal podría deberse a que las masas glaciares de Sierra Nevada desde finales del Mínimo Maunder (1645-1715) hacia el presente tenderían a mermar y, en el caso de la Hoya del Mulhacén el foco glaciar instalado redujera extensión con una dinámica más propia de nevero permanente que de glaciar dinámico.

Para la Pequeña Edad del Hielo y teniendo en cuenta que el límite inferior del cinturón crionival en Sierra Nevada durante las primeras décadas del siglo XVIII se encontraba en los 2.436 m (Rojas Clemente, 1804; Boissier, 1845), la dimensión vertical del ambiente crionival alcanzaba un desnivel de 1.042 m hasta las cumbres del macizo. Hoy en día esta diferencia se fija en 853 m, teniendo en cuenta que el límite inferior de los procesos crionivales se sitúa en los 2.625 m, es decir 189 m por encima del fijado durante la Pequeña Edad del Hielo (Gómez Ortiz et al., 2009). Considerando este hecho y que el gradiente vertical de temperatura entre el Albergue Universitario (2.507 m) y las cumbres de la Sierra es hoy de 0,49°C/100 m (Oliva, 2009), el aumento térmico registrado desde mediados de siglo XIX se establece en 0,93°C.

6. CONCLUSIONES

Los registros sedimentarios lacustres de la Laguna de la Mosca parecen confirmar que la Pequeña Edad del Hielo ha sido el periodo más frío y húmedo del Holoceno superior en Sierra Nevada. La información inferida de las fuentes documentales ha permitido cuantificar el aumento térmico experimentado desde las últimas pulsaciones de la PEH en 0,93°C respecto a los valores actuales. El *core* LM-1 revela tres periodos con aparición de un pequeño foco glaciar en la Hoya del Mulhacén, concretamente entre 2800-2700 (G1), 1200-00 (G2) y 510-240 (G3) años BP. Estas fases frías y húmedas se correlacionan con los eventos Bond en el Atlántico Norte (Bond et al., 2001). Se detecta una sincronía entre la interpretación ambiental extraída de las fuentes documentales y los datos inferidos de los sedimentos lacustres para los últimos 870 años. En efecto, fases muy frías y húmedas han propiciado la aparición de glaciares en los altos circos septentrionales, con una profusión de neveros y extensión de los procesos periglaciares en el macizo (Dark Ages, PEH). Unas condiciones moderadamente frías debieron incrementar la eficacia de los procesos geomórficos fríos holocenos aunque sin presencia de glaciares. Por el contrario, condiciones más cálidas han propiciado la desaparición de los glaciares y la reclusión de los neveros en los altos circos septentrionales, reduciendo la actividad geomórfica en el área de cumbres (OCR, OCM).

Agradecimientos

El primer autor agradece a la Generalitat de Catalunya el disfrute de una beca posdoctoral Beatriu de Pinós, durante la cual se ha escrito el presente artículo. La investigación se incluye en las actividades del Grupo de investigación 2009SGR0868 y se ampara en el proyecto “El interés científico de la documentación de época para el estudio del glaciario histórico (PEH) de Sierra Nevada (CS02009-06961)”. Se agradecen las facilidades ofrecidas por el Parque Nacional de Sierra Nevada para el trabajo de campo.

REFERENCIAS

- Bermúdez de Pedraza, F. (1638). *Historia eclesiástica de Granada*. Universidad de Granada, Granada, nueva edición de 1989.
- Bide, J.B. (1893). “Deuxième excursion dans la Sierra Nevada”. *Annuaire du Club Alpin Français*, 20, pp. 276-305.

- Boissier, C.E. (1845). *Voyage botanique dans le midi de l'Espagne pendant l'anné 1837*. Fundación Caja de Granada y Universidad de Málaga, Granada, nueva edición de 1995.
- Bond, G.; Showers, W.; Cheseby, M.; Lotti, R.; Almasi, P.; de Menocal, P.; Priore, P.; Cullen, H.; Hajdas, I. y Bonani, G. (1997). A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278, pp. 1257-1266.
- Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo Americana (1964). *Sierra Nevada*. Espasa Calpe, Madrid-Barcelona, volumen 5, pp. 425-426.
- Fernández Navarrete, F. (1732). *Cielo y suelo granadino*. G.B.G. Editora, Almería-Barcelona, nueva edición de 1997.
- García Sainz, L. (1947). *El clima de la España cuaternaria y los factores de su formación*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valencia, Valencia.
- Gómez Ortiz, A.; Palacios, D.; Schulte, L., Salvador, F. y Plana, A. (2009). Evidences from historical documents of landscape evolution after Little Ice Age of a Mediterranean high mountain area, Sierra Nevada, Spain (eighteenth to twentieth centuries). *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 91, pp. 279-289.
- IPCC (2007). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. World Meteorological Organization.
- López de Vargas Machuca, T. (1795). *Diccionario Geográfico de Andalucía: Granada*. Editorial Don Quijote, Granada, nueva edición de 1990.
- Madoz, P. (1849). *Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de España y sus posesiones de ultramar*. Madrid, volumen 14, pp. 383-386.
- Murillo Velarde, P. (1752). *Geografía Histórica. Edición del Reino de Granada. Geografía de Andalucía*. Editoriales Andaluzas Unidas, Sevilla, nueva edición de 1988.
- Nussbaumer, S.; Nesje, A. y Zumbühl, H. (2011). Historical glacier fluctuations of Jostedalsbreen and Folgefonna (Norway) reassessed by pictorial and written evidence. *The Holocene*, 21(3), pp. 455-471.
- Obermaier, H. (1916). "Los glaciares cuaternarios de Sierra Nevada". *Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales (Geología)*, 17, pp. 1-68.
- Oliva, M. (2009). *Holocene alpine environments in Sierra Nevada (Southern Spain)*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona.
- Oliva, M. Y Gómez Ortiz, A. (2012). Late Holocene environmental dynamics and climate variability in a Mediterranean high mountain environment (Sierra Nevada, Spain) inferred from lake sediments and historical sources. *The Holocene*, doi: 10.1177/0959683611434235.
- Oliva, M.; Schulte, L. y Gómez Ortiz, A. (2011). The role of aridification in constraining the elevation range of Holocene solifluction processes and associated landforms in the periglacial belt of the Sierra Nevada (Southern Spain). *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, pp. 1279-1291.
- Oliva, M.; Gómez Ortiz, A. y Schulte, L. (2010). Tendencia a la aridez en Sierra Nevada desde el Holoceno Medio inferida a partir de sedimentos lacustres. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 52, pp. 27-42.
- Oliva, M.; Schulte, L. y Gómez Ortiz, A. (2009). Morphometry and Late Holocene activity of solifluction landforms in the Sierra Nevada (Southern Spain). *Permafrost and Periglacial Processes*, 20(4), pp. 369-382.
- Oliva, M. y Moreno, I. (2008). Sierra Nevada, nexo entre dos patrones de teleconexión: la NAO y la WeMO. En: Sigró, J.; Brunet, M. y Aguilar, E. (Eds.). *Cambio Climático Regional y sus Impactos*. Publicaciones de la AEC, Serie A (6), pp. 199-208.
- Ponz, A. (1754). *Relación del viaje que hizo desde Granada a Sierra Nevada D. Antonio Ponz a influxo del Excmo. Sr. Marqués de la Ensenada*. Mensajero Económico y Erudito de Granada, Granada, pp. 25-30.
- Quelle, O. (1908). *Beiträge zur Kenntnis der spanischen Sierra Nevada*. Tesis Doctoral, Universidad de Friedrich-Wilhelm, Alemania.
- Reimer, P.J. y 28 autores (2009). "IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP". *Radiocarbon*, 51, pp. 1111-1150.
- Rute, L. (1889). *La Sierra Nevada*. Nouvelle Revue Internationale, Imprimerie Charaire et fils, París.

- Salvador Franch, F.; Oliva, M.; Salvà Catarineu, M. y Gómez Ortiz, A. (2011). Valores térmicos del suelo en tres enclaves contrastados del sector de cumbres de Sierra Nevada (periodo 2006-2009). En: Valcárcel, M. y Carrera, P. (Eds.). *Criosferas, suelos congelados y cambio climático*. Universidad de Santiago de Compostela, pp. 31-35.
- Torres Palomo, M.P. (1968). "Sierra Nevada en los escritores árabes". *Miscelánea de Estudios Árabes y Hebraicos*, 16-17, pp. 57-88.
- Wanner, H.; Holzhauser, H.; Pfister, C., y Zumbühl, H. (2000). Interannual to century scale climate variability in the European Alps. *Erdkunde*, 54, pp. 62-69.
- Warburton, J. (2007). Sediment budgets and rates of sediment transfer across cold environments in Europe: a commentary. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 89, pp. 95-100.
- Willkomm, M. (1882). *Aus den Hochgebirgen von Granada*. Caja General de Ahorros de Granada y Sierra Nevada 95, Granada, nueva edición de 1993.
- Zumbühl, H.J.; Steiner, D. y Nussbaumer, S. (2008). 19th century glacier representations and fluctuations in the central and western European Alps: an interdisciplinary approach. *Global and Planetary Change*, 60 (1-2), pp. 42-57.